

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Article, Published Version

**Montenegro, Héctor; Stelzer, Oliver; Odenwald, Bernhard**

## **Parameterstudie zum Einfluss von Gasbläschen im Grundwasser auf Porenwasserdruck und effektive Spannung bei Auflast- oder Wasserspiegeländerungen**

BAWMitteilungen

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102523>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Montenegro, Héctor; Stelzer, Oliver; Odenwald, Bernhard (2015): Parameterstudie zum Einfluss von Gasbläschen im Grundwasser auf Porenwasserdruck und effektive Spannung bei Auflast- oder Wasserspiegeländerungen. In: BAWMitteilungen 98. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 69-80.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



# Parameterstudie zum Einfluss von Gasbläschen im Grundwasser auf Porenwasserdruck und effektive Spannung bei Auflast- oder Wasserspiegeländerungen

## *Parameter study of the influence of entrapped gas bubbles in groundwater on pore water pressure and effective stress following static loading or water level changes*

Dr.-Ing. Héctor Montenegro, Dipl.-Ing. Oliver Stelzer, Dr.-Ing. Bernhard Odenwald,  
Bundesanstalt für Wasserbau

Feldbeobachtungen und Laborexperimente zeigen, dass bereits ein sehr geringes Volumen von im Porenraum eingeschlossenen Gasbläschen die Kompressibilität des Porenfluids (Wasser-Gas-Gemisch) und damit die Speichereigenschaften des Bodens erheblich vergrößert. Dies kann bei schnellen mechanischen oder hydraulischen Laständerungen die Ausbreitungsdynamik des Porenwasserdrucks sowie der Spannungen und Verformungen beeinflussen. Geotechnische Fragestellungen, bei denen die Kompressibilität des Korngerüsts und des Porenfluids eine Rolle spielen, sind aufgrund der inhärenten Wechselwirkungen zwischen Bodenverformung und Porenwasserdruck grundsätzlich gekoppelt. Im Hinblick auf eine systematische Parameterstudie wurden die maßgebenden Parameter an einem 1D-Absinkproblem auf Grundlage dimensionsanalytischer Überlegungen identifiziert. Diese sind die dimensionslose Länge des Fließweges, die Laständerungsgeschwindigkeit bezogen auf die hydraulische Durchlässigkeit sowie die Kompressibilität von Bodenmatrix und Porenfluid, ausgedrückt über den Skempton-B-Parameter. Die Ergebnisse der Parameterstudie wurden in dimensionslosen Diagrammen dargestellt, die eine rasche Abschätzung der maximalen Porenwasserungleichgewichte infolge Auflast- oder Wasserspiegeländerungen ermöglichen.

*Field observations and laboratory experiments show that even a very small volume of entrapped gas in the pore space significantly increases the compressibility of the pore fluid (water-gas mixture) and thus the storage properties of the soil. This can affect the propagation dynamics of the pore water pressure and ultimately the stresses and deformations occurring during*

*rapid mechanical or hydraulic load changes. Geotechnical problems in which the compressibility of the grain skeleton and the pore fluid play a significant role are generally coupled due to the inherent interaction between soil deformation and pore water pressure. With a view to conducting a systematic study the relevant parameters in a 1D drawdown problem were identified on the basis of a dimensional analysis. The parameters concerned are the non-dimensional drainage length, the ratio of loading velocity to hydraulic conductivity as well as the contrast between the compressibility of soil matrix and fluid, as expressed by the Skempton B parameter. The results of the parameter study are presented by non-dimensional diagrams that enable a rapid estimation of the maximum non-equilibrium pore water pressure following changes in mechanical or hydraulic loading.*

## 1 Einleitung *Introduction*

Aus einer mechanischen Be- oder Entlastung eines wassergesättigten Bodens folgt im Allgemeinen eine Verformung des Korngerüsts. Die Kompressibilität der Bodenkörner und des Wassers werden im Weiteren als vernachlässigbar angesehen. Sind sämtliche Hohlräume des Bodens mit Wasser gefüllt, tritt sogar eine momentane Erhöhung der Steifigkeit des Bodens auf, da das Porenwasser zunächst verdrängt werden muss, bevor sich das Korngerüst verformen kann. Hierbei übernimmt das Porenwasser zunächst die Beanspruchung unter entsprechender Änderung des Porenwasserdrucks. Jede Porenwasserdruckänderung wiederum

löst eine (zeitlich veränderliche) Strömung aus, von Bereichen mit höherem zu Bereichen mit niedrigerem Grundwasserpotenzial. Gemäß dem Prinzip von Terzaghi ergeben sich die effektiven Spannungen aus der Differenz der totalen Spannungen und des Porenwasserdrucks, daher weisen Verformungen ebenfalls einen zeitlichen Verlauf auf.

Hydraulische Be- oder Entlastungen, beispielsweise in Form von Wasserstandsänderungen, rufen in einem wassergesättigten Boden, im Gegensatz zu mechanischen Laständerungen, keinerlei Verformungen hervor. Dies gilt jedoch nur, wenn der Boden vollständig wassergesättigt ist. Bereits geringe Volumina von Gaseinschlüssen, beispielsweise als Folge natürlicher Wasserstandsschwankungen und/oder biogener Gasentstehung, können die Kompressibilität des Gas-Wasser-Gemischs erheblich vergrößern. Ist das Porenfluid aufgrund eingeschlossener Gasbläschen kompressibel, so folgt auf eine Wasserstandserhöhung eine Änderung des Porenwasserdrucks im unmittelbar darunter anstehenden Boden. Nun muss Wasser nachströmen, um das komprimierte Gasvolumen auszugleichen. Während dieser Zeit wirkt der externe Wasseranstieg wie eine Auflasterhöhung. Daraus wiederum resultieren eine Verformung der Bodenmatrix und eine Erhöhung der effektiven Bodenspannungen. Im Gegensatz zur mechanischen Laständerung gehen bei einer hydraulischen Belastung in einem linear elastischen Boden diese Setzungen im Verlauf des Druckausgleichs vollständig zurück (Stelzer et al., 2014).

Im Porenraum eingeschlossene Gasbläschen verändern nicht nur bei hydraulischen, sondern auch bei mechanischen Laständerungen die initiale Aufteilung der extern aufgetragenen Last zwischen Bodenmatrix und Porenfluid. Das Ausmaß dieser Aufteilung wird vom Verhältnis der Bodensteifigkeit zur Kompressionssteifigkeit des Porenfluids gesteuert (Skempton, 1954). Diese Lastaufteilung ist zeitlich veränderlich bis zum Erreichen eines neuen Gleichgewichtszustandes (Stelzer et al., 2014). Die erforderliche Zeitdauer hierfür hängt von der Länge des maßgebenden Fließweges des ausgepressten oder aufgenommenen Porenfluids, der hydraulischen Durchlässigkeit des Bodens sowie vom Betrag des Druckungleichgewichts ab.

Diese Grundüberlegungen lassen erkennen, dass beim Vorliegen von Gaseinschlüssen in einem (kompressib-

len) Boden jegliche mechanische oder hydraulische Laständerungen zeitlich veränderliche Verformungs- und Strömungsvorgänge auslösen, die streng genommen simultan beachtet werden müssen. Dabei kann das Ausmaß der Kopplung zwischen Strömung und Verformung jedoch sehr unterschiedlich sein. In der geotechnischen Ingenieurpraxis erfolgt häufig eine entkoppelte Analyse mit separater Berechnung von Strömung und Verformungen. Diese Vorgehensweise ist bei langsamen Laständerungen und kurzen Fließwegen durchaus sinnvoll, da die mit der Laständerung simultan zur Belastung ablaufende Strömung das Entstehen von größeren Ungleichgewichten (Porenwasserüberdrücken) verhindert (dränierte Bedingungen). Bei schneller Belastung eines Bodens wird dagegen angenommen, dass die Zusatzlast zunächst vollständig vom Porenfluid übernommen wird (undränierte Bedingungen). Dies ist vertretbar, wenn die Kompressionssteifigkeit des Fluids gegenüber der Bodensteifigkeit groß ist. Wie reagiert der Boden, wenn die Belastung schnell erfolgt oder der Kompressibilitätskontrast zwischen Matrix und Fluid nicht so ausgeprägt ist? Angesichts der Bedeutung des Porenwasserdrucks und der hydraulischen Gradienten in der geotechnischen Ingenieurpraxis (z. B. Standsicherheit von Baugruben beim Aushub oder von Deckwerken und Dammböschungen unter Wellenbelastung) ergibt sich der Bedarf nach einem vertieften Verständnis der Auswirkungen von Bodeneigenschaften, Gaseinschlüssen, Belastungsgeschwindigkeit auf das Auftreten von Druckungleichgewichten bei Auflast- oder Wasserspiegelländerungen.

## 2 Auswirkungen von Gaseinschlüssen im Porenraum

### *Effects of entrapped gas in the pore space*

### 2.1 Porenwasserdruck in einem Dammkern nach Wasserspiegelabsenk

#### *Pore water pressure in a dam core after water level drawdown*

Die Auswirkungen einer Wasserspiegelabsenkung auf die Porenwasserdruckverteilung in einem Erddamm (Glen-Shira-Damm in Nordschottland) wurden von Paton und Semple (1961) auf der Grundlage genauer Porenwasserdruckmessungen aufgezeichnet. Dabei wurde

ein Wasserspeicher durch einen ca. 17 m hohen Erd-  
damm eingestaut. In dem aus Moränenmaterial gebau-  
ten Dammkern, der wasserseitig mit einer Steinschüt-  
tung versehen war, fungierte eine Betonwand als  
Kerndichtung (Bild 1).

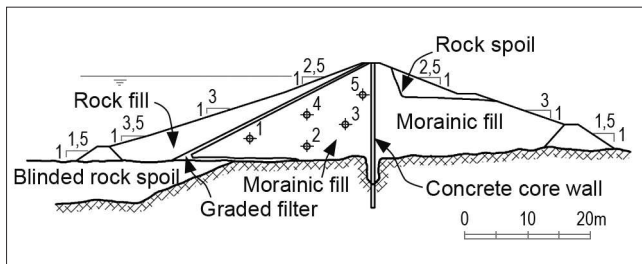


Bild 1: Glen-Shira-Damm Querschnitt (aus Pinyol et al., 2008)

*Figure 1: Glen Shira Dam (cross section from Pinyol et al., 2008)*

Im Anschluss an einer mehrwöchigen Einstauphase wurde der Wasserspiegel um ca. 9 m während eines Zeitraums von ca. vier Tagen abgesenkt. Details über den Verlauf des Absunks und der Porenwasserdruckmessungen an fünf Stellen im Dammkern (Bild 1) finden sich bei Pinyol et al. (2008) sowie Montenegro et al. (2014). Obwohl die Geschwindigkeit der Wasserstandsänderung gering erscheint, ist das Verhältnis der Absenkgeschwindigkeit  $v$  zur hydraulischen Durchlässigkeit  $k$  des Dammkernmaterials beträchtlich ( $v/k > 1000$ ), was die Entstehung von Porenwasserüberdrücken im Dammkern zur Folge hatte.

Paton und Semple (1961) werteten die Porenwasserdruckmessungen am Ende der Absenkung in Form interpolierter Isolinen des hydraulischen Potentials

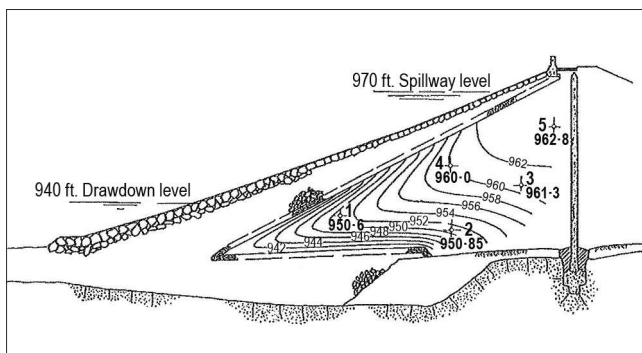


Bild 2: Zeichnerische Auswertung der am Ende der Absenkung vorhandenen Potenzialverteilung (Isolinen in ft) im Dammkern (aus Paton und Semple, 1961)

*Figure 2: Graphical representation of the head distribution (isolines in ft) in the dam core at the end of the drawdown (from Paton and Semple, 1961)*

im Dammkern zeichnerisch aus (Bild 2). Diese Darstellung zeigt, dass sich am Ende der Absenkung an der Böschung des Dammkerns und an der Aufstandsfläche das Potenzial des abgesenkten Speicherwasserspiegels eingestellt hatte. Dies war auch zu erwarten, da sich die Wasserstandsänderung im durchlässigen Felsbruchmaterial nahezu unverzüglich fortpflanzen konnte. Im Damminnen hingegen herrschten deutlich höhere Potenziale vor, als aufgrund der Durchlässigkeits- und Speichereigenschaften des Moränenmaterials zu erwarten waren. Infolge der verzögerten Druckausbreitung weist die in Bild 2 dargestellte Potenzialverteilung deutliche, von innen nach außen gerichtete hydraulische Gradienten entlang der Böschung und der Basis des Dammkerns auf. Diese verzögerte Ausbreitung der Porenwasserdrücke kann nur mit einer hohen Wasserspeicherkapazität erklärt werden, für die nur Gaseinschlüsse im Porenraum in Frage kommen, wie Paton und Semple (1961) erkannten: „*The amount of air present in the pores of a bank fill affects the pore pressure/strain relationship. This factor is not readily assessed by laboratory tests or theory*“. Die auf Grundlage eines gekoppelten FE-Modells unter Berücksichtigung von Gaseinschlüssen berechnete Potenzialverteilung in Bild 3 (Isolinen des Potentials zur besseren Vergleichbarkeit mit den Originaldaten ebenfalls in [ft] dargestellt) bestätigen nach über 50 Jahren die Richtigkeit ihrer Interpretation. Hierbei reichte ein Anteil an Gaseinschlüssen von lediglich 2 % des Gesamtvolumens aus, um die gemessenen verzögerten Ganglinien der Porenwasserdrücke sowie die in Bild 2 dargestellte Potenzialverteilung am Ende der Absenkung plausibel zu beschreiben (Stelzer et al., 2014).

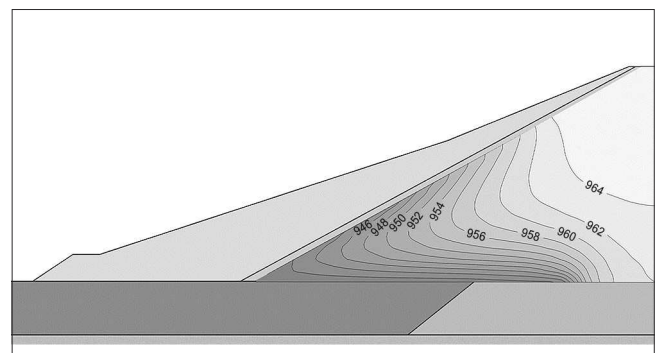


Bild 3: Numerisch, unter Berücksichtigung von Gaseinschlüssen berechnete Potenzialverteilung (Isolinen in ft) am Ende der Absenkung (Stelzer et al., 2014)

*Figure 3: Numerical calculation of the head distribution (isolines in ft) at the end of the drawdown, taking account of gas entrapment (Stelzer et al., 2014)*



## 2.2 Absenkexperimente an Bodensäulen

### *Drawdown experiments on soil columns*

An der BAW wurde die Relevanz von Gaseinschlüssen im Grundwasser im Kontext der Standsicherheitsbeurteilung von Kanalböschungen unter Wellenbelastung bereits in den 1980er-Jahren erkannt (Schulz, 1986) und in der Folge untersucht (Köhler, 2001; Alberts, 2002; Köhler und Montenegro, 2003; Montenegro et al., 2003; Stelzer et al. 2014). Gaseinschlüsse konnten in einer Reihe von Bodensäulenversuchen als die Hauptursache für die verzögerte Porenwasserdruckausbreitung experimentell identifiziert werden. Im Versuchsstand wurden die Porenwasserdruckreaktionen im Innern einer Bodensäule auf definierte Änderung des Wasserstandes am Säulenkopf aufgezeichnet, wie in Bild 4 (rechts) dargestellt.

Die Kurven im Diagramm in Bild 4 (links) zeigen die Porenwasserdruckdifferenz in Bezug auf den (zeitlich veränderlichen) Wasserdruck am Säulenkopf. Deutlich erkennbar ist das Nachlaufen der Porenwasserdrücke an den Druckaufnehmern im Inneren der Bodensäule während des nur wenige Sekunden dauernden Absenkvorganges. Die verzögerte Druckausbreitung bewirkt Porenwasserüberdrücke. Bereits nach wenigen Sekunden gleichen sich die Druckunterschiede aus

und es stellt sich in der gesamten Säule das neue Potenzialniveau ein. Mit einer Strömungsberechnung des Experiments unter der Annahme von Vollsättigung (sehr hohe Kompressionssteifigkeit des Fluids bzw. geringer Speicherkapazität) konnten die beobachtete Verzögerung der Porenwasserdruckausbreitung und letztlich die festgestellten Porenwasserüberdrücke nicht abgebildet werden. Erst die Berücksichtigung einer erheblich größeren Speicherkapazität ermöglichte es, die beobachtete verzögerte Ausbreitung der Druckänderung abzubilden. Für die erforderliche Erhöhung der Speicherkapazität reichte bereits ein geringes Gasvolumen (Gassättigung < 2 %) aus, eine Größenordnung, die messtechnisch kaum zu erfassen ist.

## 2.3 Interpretation der Feld- und Laborbeobachtungen

### *Interpretation of field and laboratory observations*

Die im Feld und im Labor beobachtete verzögerte Druckausbreitung während des Absenkvorganges hängt mit der Dekompression der Gasphase zusammen, wobei das sich vergrößernde Gasvolumen das umgebende Porenwasser verdrängen muss. Diese Verdrängung geht einher mit einer Porenwasserdruck-

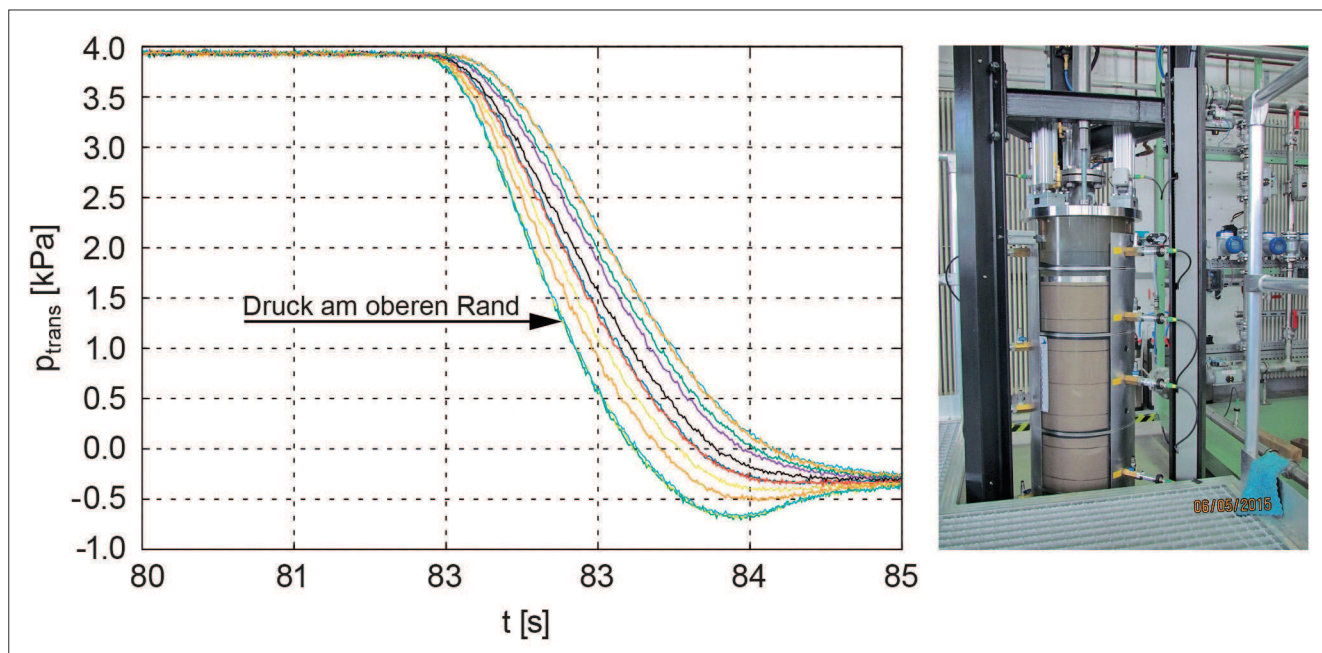


Bild 4: Porenwasserdruckmessungen im Innern einer Bodensäule infolge einer Wasserstandsänderung am Säulenkopf (links) des BAW-Bodensäulenversuchsstands (rechts)

Figure 4: BAW soil column test rig (right) for measuring the pore water pressure dynamics within a soil column as a result of a change in the water level at the top of the column (left)

erhöhung, welche der extern aufgetragenen Porenwasserdruckverringerung entgegen wirkt. Aus diesem Druckungleichgewicht entwickeln sich in Richtung der Fließränder gerichtete hydraulische Gradienten, die im Verlauf eines Dissipationvorganges zu einer Entlastung führen, so lange bis die Druckverteilung mit dem neuen Potenzial im Gleichgewicht steht. Die für einen Ausgleich erforderliche Zeit hängt vom hydraulischen Gradienten, der Länge des Fließwegs und von der hydraulischen Durchlässigkeit ab. Bei dem oben beschriebenen Erddamm waren der Fließweg lang und die Durchlässigkeit gering. Daher dauerten die Druckungleichgewichte vergleichsweise lang an. Die hydraulische Durchlässigkeit in der Laborsäule war hingegen groß und der Fließweg kurz. Daher war der Dissipationsprozess bereits nach wenige Sekunden abgeschlossen. Dieser Vergleich zeigt, dass Begriffe wie *schnell* oder *langsam* zur Charakterisierung der Laständerungsgeschwindigkeit stets im Kontext der Durchlässigkeitseigenschaften zu sehen sind (Montenegro et al., 2014).

## 2.4 Bedeutung für die Schifffahrt

### *Significance for shipping*

Um die Ufer von Binnenwasserstraßen dauerhaft vor negativen Auswirkungen infolge hydraulischer Belastung aus Schifffahrt zu schützen, werden diese i. d. R. mit Deckwerken aus Steinschüttungen gesichert, wie in Bild 5 schematisch dargestellt. Die Schiffswellen bewirken einen Absenk mit einer Geschwindigkeit von bis zu 0,1 m/s und einer Höhe von bis zu ca. 1 m. Je nachdem

welche Steifigkeits- und Durchlässigkeitseigenschaften der Boden aufweist sowie welches Volumen an Gaseinschlüssen im Boden vorhanden ist, können sich bei dieser Wellenbelastung angesichts der oben skizzierten Prozesse stark unterschiedliche Porenwasserdruckverteilungen einstellen.

Um die Bandbreite möglicher Porenwasserdruckreaktionen auf eine derartige hydraulische Belastung abzuschätzen, werden im Folgenden die maßgebenden Parameter an einem überschaubaren Fallbeispiel identifiziert und deren Bedeutung im Rahmen einer nachfolgenden Parameterstudie systematisch untersucht.

## 3 Poroelastischer Ansatz

### *Poroelastic approach*

Durch die Kombination von Prinzipien der Massen- und Impulserhaltung mit dem Darcy-Gesetz und dem Hookeschen Gesetz hat Maurice Biot ein heute allgemein akzeptiertes Modell zur Beschreibung von poroelastischem Verhalten hergeleitet (Verruijt, 2014; Wang, 2000; Kümpel, 1991). Die Leistung Biots liegt darin, diese Verformungs- und Strömungsprozesse unter Beachtung physikalisch basierter Prinzipien in einen Satz gekoppelter Differenzialgleichungen überführt zu haben. Nach Vorgabe von Anfangs- und Randbedingungen sowie Materialparametern beschreiben diese Differenzialgleichungen vier Zustandsvariablen, die Ortsverschiebungen  $u_i$  in den drei Koordinatenrichtungen und den Porenwasserdruck  $p$  in Abhängigkeit von Raum und Zeit (Montenegro und Stelzer, 2014).

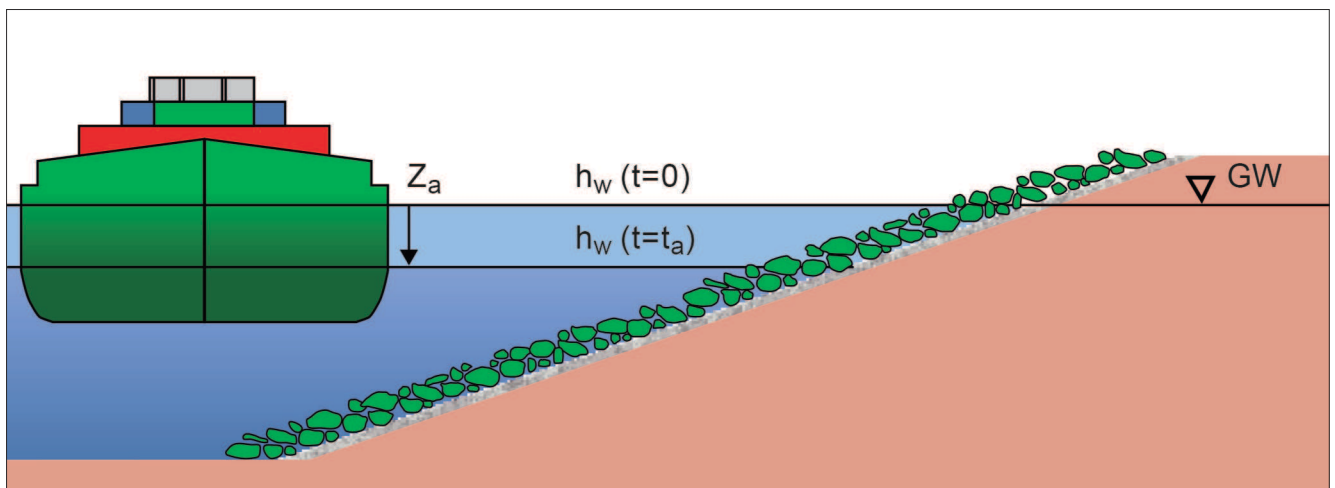


Bild 5: Systemskizze zur Belastung von Gewässersohlen und Böschungen durch schiffserzeugte Wellen  
 Figure 5: Schematic representation of the loading of riverbeds and embankments by ship generated waves

### 3.1 Gaseinschlüsse und Fluidkompressibilität *Entrapped gas and compressibility of fluids*

Zur Beschreibung der die Fluidkompressibilität erhöhenden Gaseinschlüsse bieten sich grundsätzlich zwei verschiedene Möglichkeiten an (Montenegro und Stelzer, 2014). Ein vereinfachter Ansatz mit einer druckunabhängigen Kompressibilität  $C_{wg}$  [L<sup>2</sup>/F] für das Wasser-Gas-Gemisch erlaubt eine kompakte Beschreibung des Steifigkeitsverhältnisses von Boden und Fluid, wie weiter unten dargestellt wird. Die Kompressibilität  $C_{wg}$  wird aus der volumetrisch gewichteten Summe der Kompressionssteifigkeiten von Wasser  $K_w$  [F/L<sup>2</sup>] und Gas  $K_g$  [F/L<sup>2</sup>] ermittelt:

$$C_{wg} = \frac{1}{K_{wg}} = \frac{S}{K_w} + \frac{(1-S)}{K_g} = \frac{S}{K_w} + \frac{(1-S)}{(p_a + p)} \quad (1)$$

Bei Gasen folgt die Kompressibilität in erster Näherung dem Boyle-Mariotte-Gesetz und entspricht somit dem vorherrschenden absoluten Druck, der Summe aus atmosphärischem Druck  $p_a$  und mittlerem Porenwasserdruck. Da eine Druckänderung eine Volumenänderung der Gasphase und somit eine Sättigungsänderung zur Folge hat, muss der Sättigungsgrad  $S$  für das betrachtete Druckniveau ebenfalls abgeschätzt werden. Neuere Laboruntersuchungen zeigen, dass der Sättigungsgrad zwischen 0,95 und 0,99 variieren kann, allerdings ist der Zusammenhang zwischen Druck und Sättigung abhängig von der Vorgeschichte des Bodens (Alsherif et al., 2015).

### 3.2 Charakterisierung der Kompressibilität für das Feststoff-Wasser-Gas-System *Characterisation of the compressibility of the solids-water-gas system*

Zur Beschreibung der Kompressibilität des Boden-Wasser-Gassystems bietet es sich an, auf den Ansatz von Skempton zur Aufteilung von Laständerungen zwischen Bodenmatrix und Porenfluid zurückzugreifen (Stelzer et al., 2014; Montenegro und Stelzer, 2014). Der dimensionslose Skempton-B-Parameter [-] beschreibt, welche Porenwasserdruckänderung  $dp$  sich infolge einer externen Auflaständerung  $d\sigma$  bei undrännierten Verhältnissen ergibt, bzw. welche Änderung der totalen Spannung  $d\sigma$  sich infolge einer externen Porenwasserdruckänderung

$dp$  einstellt. Der B-Parameter beschreibt somit, wie sich eine externe Laständerung zwischen Matrix und Fluid aufteilt. Im Kontext einer 1D-Betrachtung ist der B-Parameter mit verhinderter Seitendehnung zu bestimmen (Wang, 2000).

$$B \stackrel{\text{def}}{=} \left. \frac{dp}{d\sigma} \right|_{\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = 0} \quad (2)$$

Maßgebend für den Parameter B ist das Verhältnis der Kompressionssteifigkeiten von Boden und Fluid (Wang, 2000; Verruijt, 2014). Algebraische Umformungen zeigen, dass B dem Verhältnis der Matrixkompressibilität zur Summe der Kompressibilität von Matrix und Fluid (unter Berücksichtigung des Raumanteils  $n$ ) entspricht:

$$B = \frac{1}{1 + n C_{wg} E_s} = \frac{\frac{1}{E_s}}{\left( \frac{1}{E_s} + n C_{wg} \right)} \quad (3)$$

Da die Fluidkompressibilität  $C_{wg}$  nach Gleichung (1) vom Sättigungsgrad abhängt, liegt eine indirekte Verknüpfung zwischen B-Parameter und dem Sättigungsgrad  $S$  vor. Dies macht man sich bei Triaxialzellenversuchen zu Nutze, um den Sättigungsgrad der Probe zu bestimmen (Wang, 2000). Je nach Steifemodul  $E_s$ , Porosität  $n$  und Kompressibilität  $C_{wg}$  variiert B zwischen 0 und 1. Ein Lastaufteilungsparameter  $B \approx 1$  charakterisiert ein System mit einem inkompressiblen Fluid (bzw. Vollsättigung), bei dem eine Auflaständerungen vollständig vom Fluid aufgenommen wird (undränniert). Am anderen Ende der Werteskala beschreibt  $B \approx 0$  ein System mit einem im Vergleich zum Korngerüst sehr kompressiblen Porenfluid, bei dem eine externe Auflaständerung nahezu keine Auswirkungen auf den Fluidruck hat.

Analog zur statischen Auflaständerung  $d\sigma$  lässt sich die Aufteilung auf Korngerüst und Fluid gemäß B-Parameter auch für eine hydraulische Laständerung  $dh \cdot \gamma_w$  herleiten. Dabei ist es sinnvoll, die resultierenden Porenwasserdruckänderungen  $dp$  auf den Endzustand nach Erreichen des neuen Gleichgewichts zu beziehen. Hierbei stellen  $p_0$  den Porenwasserdruck vor der Einwirkung und  $p_s$  den (stationären) Endzustand dar:

$$\begin{aligned} dp &= p - p_s = (p_0 + B dh \gamma_w) - (p_0 + dh \gamma_w) \\ &= (B - 1) dh \gamma_w \end{aligned} \quad (4)$$

Interessanterweise entspricht die Porenwasserdruckreaktion  $dp$  auf eine hydraulische Einwirkung  $dh \cdot \gamma_w$  gerade dem Komplement (B-1) einer (entsprechend großen) statischen Auflaständerung  $d\sigma = dh \cdot \gamma_w$ . Hierbei baut sich bei Absink ( $dh < 0$ ) beispielsweise ein Porenwasserüberdruck und bei Aufstau ( $dh > 0$ ) ein Porenwasserdruckdefizit auf, jeweils bezogen auf den stationären Endzustand (Stelzer et al., 2014; Montenegro und Stelzer, 2014).

## 4 Maßgebende poroelastische Parameter

### *Relevant poroelastic parameters*

Anhand eines Absinks  $\Delta h$  mit konstanter Geschwindigkeit  $v = \Delta h/t_0$  während der Zeitdauer  $t_0$  (Ende des Absinkvorgangs) am Kopf einer Bodensäule der Länge  $L$  (Bild 6) lassen sich mittels Dimensionsanalyse die für das poroelastische Problem maßgebenden Parameter identifizieren. Der Boden kann sich nur in der vertikalen Richtung verformen, allerdings ist der untere Rand unverschieblich. Nur der obere Rand ist hydraulisch an der darüber liegenden Wassersäule angebunden, so dass Zu- und Abflüsse ausschließlich über den oberen Rand erfolgen.

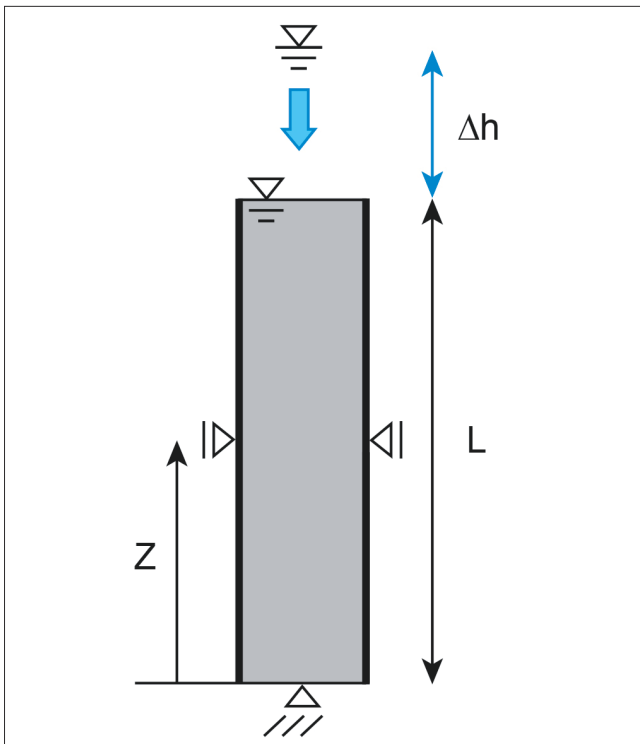


Bild 6: Schematische Darstellung des ein-dimensionalen Absinkproblems

Figure 6: Schematic representation of the one-dimensional drawdown problem

Zur Berücksichtigung der geometrischen Einflussgrößen wurde die Länge des maximalen Fließweges  $L$  [L] (Entfernung des unteren undurchlässigen Randes bis zum oberen offenen Rand) mit dem Betrag des Wasserspiegelabsinks  $\Delta h$  [L] zu einem dimensionslosen Parameter zusammengefasst. Des Weiteren wurde die Absinkgeschwindigkeit  $v = \Delta h/t_0$  [L/T] mit der hydraulischen Durchlässigkeit  $k$  [L/T] zu einem dimensionslosen kinematischen Parameter normiert und schließlich wurden die Speichereigenschaften (Kompressibilität von Korngerüst und Porenfluid) mit Hilfe des oben eingeführten dimensionslosen, dynamischen Parameters  $B$  beschrieben. Die für dieses Problem interessierende Zustandsgröße, der maximale Porenwasserüberdruck  $\Delta p$ , tritt zum Zeitpunkt  $t_0$  auf und wird mit dem Absink  $\Delta h$  sowie der spezifischen Wichte von Wasser  $\gamma_w$  [F/L<sup>3</sup>] dimensionslos gemacht. Hierbei setzt sich der Porenwasserdruck  $p$  aus dem hydrostatischen Anteil  $p^{\text{hydro}}$  im stationären Endzustand und dem Porenwasserdruckunterschied  $\Delta p$  zu  $p = p^{\text{hydro}} + \Delta p$  zusammen. Es ergibt sich folgender dimensionsloser Zusammenhang, der aufzeigt, dass der Porenwasserüberdruck lediglich von drei oben beschriebenen Parametern abhängt:

$$\left. \frac{\Delta p(z/L)}{\Delta h \gamma_w} \right|_{t_0} = F\left(\frac{\Delta h}{L}, \frac{v}{k}, \frac{1}{1 + n C_{wg} E_s}\right) \quad (5)$$

## 5 Analytische Lösung

### *Analytical solution*

Eine 1D-Betrachtung erlaubt es, die einachsiale Verformungsänderung  $\Delta \epsilon$  durch die Differenz aus totaler Spannung und Porenwasserdruckänderung  $1/E_s (\sigma - \Delta p)$  auszudrücken, wodurch sich das gekoppelte Gleichungssystem auf eine Diffusionsgleichung vom Boussinesq-Typ mit  $\Delta p$  als Zustandsvariable reduzieren lässt (Wang, 2000):

$$\frac{\partial^2 \Delta p}{\partial z^2} - \frac{1}{c} \frac{\partial \Delta p}{\partial t} = \frac{(B-1)}{c} \frac{\Delta h}{t_0} \gamma_w \quad (6)$$

Die Anfangs- und Randbedingungen zur Auswertung obiger Differenzialgleichung lauten:



$\Delta p(z, t = 0) = \gamma_w \Delta h$	hydrostatischer Anfangszustand bzw. Porenwasserüberdruck $\gamma_w \Delta h$ bezogen auf den Endzu- stand
$\Delta p(z = L, t) = \gamma_w \Delta h (1 - t/t_0)$	linear abnehmender Porenwas- serüberdruck am oberen Rand
$d\Delta p(z = 0, t)/dz = 0$	geschlossener unterer Rand bzw. hydrostatischer Druck
$dw(z, t = 0)/dz = 0$	keine Verformungen im An- fangszustand
$w(z = 0, t) = 0$	unverschieblicher unterer Rand

In Gleichung (6) stellt  $c = k/(\gamma_w (1/E_s + n C_{wg})) [L^2/T]$  den von Terzaghi eingeführten Konsolidierungskoeffizienten dar, der das Verhältnis der hydraulischen Durchlässigkeit  $k [L/T]$  zu dem in der Geohydraulik im Allgemeinen verwendeten Speicherkoeffizienten  $S_s [1/L]$  charakterisiert. Der Speicherkoeffizient stellt die mit der Wichte des Wassers multiplizierte Summe der Kompressibilität von Bodenmatrix und Porenfluid dar ( $S_s = \gamma_w (1/E_s + n C_{wg})$ ).

Ende der 1940er-Jahre veröffentlichten der Mathematiker Horatio Scott Carslaw und der Geophysiker John Conrad Jaeger das Buch „*Conduction of Heat in Solids*“, in dem sie eine analytische Lösung angeben, die die Wärmeausbreitung in einem Stab beschreibt, der in der Mitte mit linear ansteigender Temperatur erwärmt wird (Carslaw und Jaeger, 2. Ausgabe 1959, S. 130). Dieses abstrakt wirkende Wärmeleitungsproblem kann auf die Ausbreitung einer Porenwasserdruckänderung in einer Bodensäule infolge einer äußeren, zeitlich veränderlichen, mechanischen Beanspruchung übertragen werden (Wang, 2000). Die zeitlich veränderliche Auflaständerung  $d\sigma$  lässt sich gemäß Gleichung (4) durch eine Wasserstandsänderung  $(B-1) \Delta h$   $\gamma_w$  ersetzen. Dies ermöglicht die von Carslaw und Jaeger beschriebene analytische Lösung auf das hier behandelte Problem einer Bodensäule mit einer darüber anstehenden Wassersäule, die mit konstanter Geschwindigkeit  $\Delta h/\Delta t$  abgesenkt wird, zu übertragen:

$$\Delta p(z, t) = \frac{(B-1) L^2 \gamma_w \Delta h}{c} \frac{1}{2 t_0} \left\{ 1 - \frac{z^2}{L^2} - \frac{32}{\pi^3} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{(2m+1)^3} \cdot e^{\left[ \frac{-(2m+1)^2 \pi^2 c t}{4L^2} \right]} \cdot \cos \left[ \frac{(2m+1) \pi z}{2L} \right] \right\} \quad (7)$$

Die analytische Lösung als Funktion mit  $m$  Summengliedern ( $m \rightarrow \infty$ ) liefert den Druckunterschied (Porenwasserüberdruck im Falle eines Absunks)  $\Delta p(z, t)$  über die Höhe der Bodensäule und die Zeit. Dieser Ausdruck lässt sich vergleichsweise einfach codieren oder mittels Tabellenkalkulationsprogramm auswerten und wurde mittels gekoppelter FE-Berechnungen überprüft. Diese ergaben, dass die analytische Lösung für  $m > 50$  bereits sehr akkurate Ergebnisse liefert.

## 6 Parameterstudie

### *Parameter study*

Die Berechnungsergebnisse sind in Bild 7 in Form von Vertikalprofilen des dimensionslosen Porenwasserüberdrucks  $dp/(\gamma_w \Delta h)$  zum Zeitpunkt  $t_0$  am Ende des Absunks, wenn sich die maximalen Porenwasserüberdrücke aufgebaut haben, veranschaulicht. Hierbei wurden folgende dimensionslose Kenngrößen verwendet:

$\Delta p/(\gamma_w \cdot \Delta h)$	auf die externe Wasserstands- änderung bezogene Porenwas- serüberdrücke
$z/L$	bezogene Höhenlage innerhalb der Bodensäule
$L/\Delta h$	auf die Wasserstandsänderung bezogene Höhe der Boden- säule
$v/k = \Delta h/(\Delta t \cdot k)$	auf die hydraulische Durchläs- sigkeit bezogene Absunkge- schwindigkeit

Bei den Porenwasserüberdruckprofilen ergibt sich über den gesamten Parameterbereich eine ausgezeichnete Übereinstimmung zwischen der numerischen Berechnung und der analytischen Lösung.

Die Vertikalprofile der Porenwasserüberdrücke wurden für unterschiedliche B-Parameter ( $0 < B < 1$ ) berechnet, sodass alle möglichen Steifigkeitsverhältnisse im Boden-Fluid-System berücksichtigt werden.

Am oberen Rand bei  $z/L = 1$  kann Wasser ausströmen, daher kann sich dort kein Porenwasserüberdruck aufbauen. Am unteren Rand bei  $z/L = 0$  befindet sich ein undurchlässiger (und unverschieblicher) Rand und dort stellt sich entsprechend der größte Porenwasserüberdruck auf und beträgt  $dp = (B-1) \Delta h \gamma_w$ .

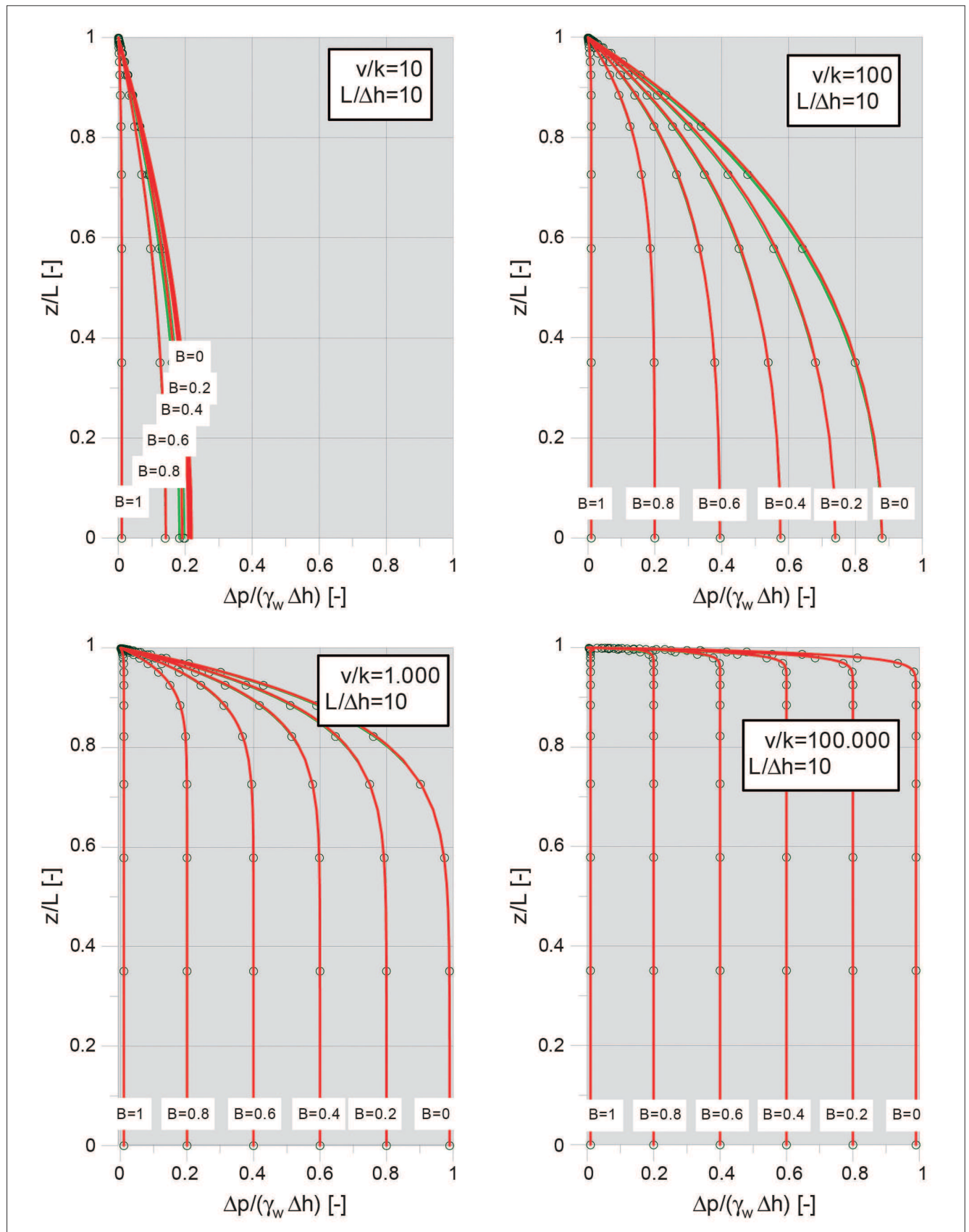


Bild 7: Vertikalprofile des dimensionslosen maximalen Porenwasserüberdrucks am Ende des Absunks (Kreissymbole: analytische Lösung; Linien: FE-Modell)

Figure 7: Non-dimensional excess pore water pressure profiles at the end of the drawdown (Circle symbols: analytical solution; lines: FE-model).

In der dimensionslosen Auftragung münden die normierten Porenwasserdruckprofile bei  $z/L = 0$  gerade bei IB-1I, was die Identifikation der zum jeweiligen B-Wert gehörigen Kurve erleichtert. Allerdings trifft dies nicht bei  $v/k < 10$  zu. Aufgrund der geringen Absunkgeschwindigkeit, bezogen auf die Durchlässigkeit, hat das Wasser genügend Zeit, am oberen zu dränieren, sodass sich zum Zeitpunkt  $t_0$  nur geringere Überdrücke aufbauen können.

Die für die Berechnungen verwendeten  $v/k$ -Werte variieren von 10 bis 100.000. Obwohl bei gering durchlässigen Böden durchaus größere  $v/k$ -Werte denkbar sind, zeigen die Ergebnisse in Bild 7, dass bereits ab  $v/k > 100.000$  nahezu undränierete Verhältnisse vorliegen. Der Druckabfall infolge Absunk bleibt hierbei bis zum Ende des Absunks auf den oberen Rand beschränkt, während im Innern der Anfangsdruck vorherrscht.

Aus Platzgründen werden nur Ergebnisse für ein geometrisches Verhältnis von  $L/\Delta h = 10$  dargestellt. Geringere  $L/\Delta h$ -Werte entsprechen kürzeren Fließwegen, was dem Aufbau von Porenwasserüberdrücken entgegen wirkt, jedenfalls im Bereich geringer  $v/k$ -Werte.

Aus den Vertikalprofilen der Druckänderungen lassen sich die Verteilungen der effektiven Spannungen und letztlich der Verformungen berechnen.

## 7 Schlussfolgerungen *Conclusions*

Die Berücksichtigung von Gaseinschlüssen über eine druckunabhängige Kompressibilität des Gas-Wasser-Gemisches  $C_{wg}$  stellt für Belastungszustände mit großen Porenwasserdruckänderungen sicherlich eine grobe Näherung dar (Montenegro und Stelzer, 2014). Der simple Ansatz erlaubt jedoch eine einfache Charakterisierung des Steifigkeitskontrastes zwischen Bodenmatrix und Porenfluid über den Skempton-B-Parameter. Dies ermöglicht für den eindimensionalen Fall die mathematische Reduktion des gekoppelten Gleichungssystems auf eine überschaubare Differenzialgleichung des Boussinesq-Typs. Ein physikalisch basierter Ansatz mit einer druckabhängigen Fluidkompressibilität führt zu einer Nichtlinearität der Differenzialgleichung, was eine analytische Lösung des eindimensionalen Prob-

lems vermutlich ausschließt. Stelzer et al. (2014) haben einen druckabhängigen Ansatz für die Kompressibilität des Gas-Wasser-Gemisches in ein gekoppeltes FE-Modell implementiert und die Unterschiede zwischen den Berechnungsergebnissen mit diesen beiden Ansätzen an einem Beispiel erläutert. Diese Autoren legen weiterhin nahe, weitere Aspekte des Bodenverhaltens, wie z. B. die Spannungsabhängigkeit der Steifigkeit, durch die Verwendung eines geeigneten Stoffgesetzes zu berücksichtigen.

Ebenfalls unberücksichtigt bleibt im vorgestellten Ansatz die Änderung der Durchlässigkeit infolge Verformung. Dies würde ebenfalls eine Nichtlinearität der Differenzialgleichung bedingen, was eine analytische Lösung des Problems ebenfalls erheblich erschweren dürfte. Diese Effekte lassen sich nur auf numerischem Weg untersuchen, allerdings existieren bisher kaum aus Experimenten gewonnene, belastbare Daten über den Zusammenhang zwischen Durchlässigkeit und Volumenänderung.

Aufgrund der inhärenten Kopplung zwischen Fluidströmung und Bodenverformung ist die Bedeutung der verschiedenen Parameter hinsichtlich ihrer poroelastischen Auswirkungen zunächst kaum abschätzbar. Die vorgestellten dimensionslosen Diagramme erlauben es jedoch, die entstehenden Porenwasserüberdrücke aufgrund einer Belastung definierter Geschwindigkeit abzuschätzen und dabei den Einfluss der drei maßgebenden poroelastischen Parameter,  $L/\Delta h$ ,  $v/k$  und  $B$  systematisch zu beurteilen.

Die Porenwasserüberdruckprofile zeigen, dass zwischen den Extremzuständen undrännierter ( $B = 0$ ) und drännierter ( $B = 1$ ) Verhältnisse durchaus Zwischenzustände existieren, die vom Steifigkeitsverhältnis zwischen Bodenmatrix und Porenfluid abhängen. Die Berechnungsergebnisse geben den Betrag des Porenwasserüberdrucks, bezogen auf den Betrag des Absunks  $dh \cdot \gamma_w$ , an. Dieser Porenwasserüberdruck bleibt unberücksichtigt, wenn man bei der Analyse des Problems fälschlicherweise von drännierten Zuständen ausgeht. Die dimensionslosen Diagramme bieten letztlich ein physikalisch fundiertes Entscheidungskriterium, ob nicht doch eine undrännierte Berechnung oder gar eine gekoppelte Analyse für die jeweilige Fragestellung zielführender wäre.

Die vorgestellten Berechnungen wurden in Hinblick auf wasserbauliche Fragestellungen im Zusammenhang mit der Belastung von Kanalböschungen bei Wasserstandsabsink durch schiffsinduzierte Wellen konzipiert. Es ist jedoch ohne großen Aufwand möglich, die Profile auf andere Belastungssituationen, wie Wasserstandsaufstau sowie Aufbringung oder Reduzierung mechanischer Lasten, zu übertragen.

Obwohl die vorgestellte Parameterstudie wesentliche Aspekte von poroelastischem Verhalten zugänglich macht, darf nicht vergessen werden, dass eine direkte und hinreichend genaue Erfassung der Gassättigung derzeit, selbst unter Laborbedingungen, nicht verfügbar ist. Eine Abschätzung des eingeschlossenen Gasvolumens ist gegenwärtig nur invers möglich, d. h. durch Auswertung der gemessenen Porenwasserüberdrücke in einem Modellversuch mit klar definierten hydraulischen Randbedingungen oder, wie im Fall des Glen-Shira-Damms, durch einen Naturversuch mit gut dokumentierten Porendruckmessungen. Erste Auswertungen und Literaturangaben deuten darauf hin, dass Gaseinschlüsse in Gewässersohlen sowie im Grundwasser eher die Regel als die Ausnahme darstellen und dass diese sich in einem Sättigungsbereich (Anteil des Gases am Porenvolumen) zwischen 1 % und 5 % bewegen. Neben dem Porenwasserdruck (Tiefe des Bodenelements unter der Grundwasseroberfläche) und der Porenraumstruktur dürfte die Vorgeschichte, die zu Gaseinschlüssen geführt hat, für den Sättigungsgrad entscheidend sein. Bei der Beurteilung des möglichen Gasanteils im Porenraum sollte berücksichtigt werden, dass, wie die Parameterstudie gezeigt hat, selbst hohe Gassättigungen ( $B \approx 0$ ) erst ab  $v/k$ -Werten  $> 10$  einen relevanten Einfluss auf die Porenwasserüberdrücke haben und dass bei darunter liegenden  $v/k$ -Werten im Allg. von dränierten Verhältnissen ausgegangen werden kann.

Derzeit noch nicht untersucht ist der räumliche Einfluss, wenn eine Belastung nicht ein-dimensional erfolgt. Es ist anzunehmen, dass zumindest im Randbereich der Belastung die Porenwasserüberdrücke deutlich geringer ausfallen dürften als die auf Grundalge einer ein-dimensionalen Analyse errechneten, da hier die Möglichkeit eines räumlichen Druckausgleichs besteht. Ferner liefern Scherdehnungen durch das dilatante/kontraktante Verhalten des Bodens auch einen Beitrag zur Volumenveränderung und letztlich zum poroelastischen Verhalten. Aufgrund der vielfältigen Konfigurationsmög-

lichkeiten derartiger Fragestellungen dürfte die Anzahl maßgebender Parameter schnell ansteigen und eine überschaubare Darstellung, wie sie hier für den 1D-Fall entwickelt wurde, verhindern. Für komplexere Probleme ist daher eine fallspezifische, numerische Analyse mittels gekoppelter Strömungs- und Spannungs-Verformungsberechnung erforderlich.

## 8 Literatur References

Alberts, D. (2002): Porenwasserdruckmessungen im teilgesättigten Sand der Unterwasserböschungen am Nord-Ostsee-Kanal. In: Teilgesättigte Böden. 3. Workshop Weimar 2001. Hrsg.: Bauhaus-Univ. Weimar, Professur Bodenmechanik. Universitätsverlag Bauhaus-Universität 2002, ISBN 978-3-86068-167-1.

Alsherif, N., Wayllace, A., Lu, N. (2015): Measuring the soil water-retention curve under positive and negative matric suction regimes. *Geotechnical Testing Journal*. Vol. 38. No. 5.

Köhler, H.-J. (2001): Dreiphasensystem Boden unter Wasser. Auswirkungen auf die Porenwasserspannungen. Schriftenreihe Geotechnik, 3. Workshop „Teilgesättigte Böden“, Bauhaus-Universität Weimar, 12. Oktober 2001, T. Schanz & K.J. Witt (eds.), Weimar, Heft 06, pp. 59-90.

Köhler, H.-J.; Montenegro, H. (2003): Investigations regarding soils below phreatic surface as unsaturated porous media. In: *Unsaturated Soils: Numerical and Theoretical Approaches: Proceedings of the International Conference "From Experimental Evidence Towards Numerical Modeling of Unsaturated Soils"*, Weimar, Germany, September 18-19, 2003.

Kümpel, H.-J. (1991): Poroelasticity: parameters reviewed. *Geophys. J. Int.* 105, pp. 783-799.

Montenegro, H., Köhler, H.-J., Holfelder, T. (2003): Unsaturated Soils: Inspection of excess pressure propagation in the zone of gas entrapment below the capillary fringe. In: *Unsaturated Soils: Numerical and Theoretical Approaches: Proceedings of the International Conference "From Experimental Evidence Towards Numeri-*

cal Modeling of Un-saturated Soils“, Weimar, Germany, September 18-19, 2003.

Montenegro, H., Stelzer, O. (2014): Untersuchung des Einflusses von Gaseinschlüssen unterhalb des Grundwasserspiegels auf Druckausbreitung und Bodenverformungen mittels gekoppelter FE-Berechnungen. Ohde Kolloquium 2014 Mitteilungsheft 19. Institut für Geotechnik. Technische Universität Dresden.

Narasimhan, T. N. (2006): On Storage Coefficient and Vertical Strain. Ground Water. Vol. 44, No.3.

Paton, J., Semple, N. G. (1961): Investigation of the Stability of an Earth Dam Subject to Rapid Drawdown including Details on Pore Pressures recorded during a Controlled Drawdown Test. In: Pore Pressure and Suction in Soils, pp. 85-90, Butterworth, London.

Pinyol, N. M.; Alonso, E. E., Olivella, S. (2008): Rapid drawdown in slopes and embankments. Water Resources Research 44, 2008 W00D03, 22pp.

Schulz, H. (1986): Kompressibilität und Porenwasserüberdruck – Bedeutung für Gewässersohlen. Mitteilungsblatt der BAW Nr. 58.

Stelzer, O., Montenegro, H., Odenwald, B. (2014): Consolidation Analyses Considering Gas Entrapment below the Phreatic Surface. Numerical Methods in Geotechnical Engineering. Proceedings. 1368 Pages, May 29, 2014 CRC Press.

Skempton, A. W. (1954): The pore pressure coefficients A and B. Géotechnique 4(4): 143-147.

Verruijt, A. (2014): Theory and problems of poroelasticity. Delft University of Technology. <http://geo.verruijt.net>

Wang, H. F. (2000): Theory of Linear Poroelasticity with Applications to Geomechanics and Hydrogeology. Princeton University Press.